

# **DESARROLLO DE UN MODELO DE ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO Y DE AGUA EN UNA ZONA URBANIZADA SITUADA EN UN ÁREA DE ALTA IRRADIACIÓN SOLAR.**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY

INSTITUTO DE TERMODINÁMICA Y  
TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA

**DANIEL PONS STRIGARI**

**JUNIO 2009**

## ÍNDICE

1. INTRODUCCION
2. ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA EL DESARROLLO DE POSIBLES SISTEMAS
3. ESTIMACIÓN DE DEMANDA DE AGUA
4. ESTIMACIÓN DE DEMANDA ELÉCTRICA
5. MODELO DE PLANTA DE POTENCIA
6. PLANTA DESALADORA
7. CONCLUSIONES

# 1. INTRODUCTION

Este texto es un resumen del proyecto de fin de carrera (PFC) completo, escrito en inglés y presentado en la Universidad Técnica de Viena. El texto original consta de 153 páginas en total en las que se incluye, por supuesto, más información y mayor detalle y en donde se profundiza en cualquiera de los puntos aquí recogidos.

En muchas ocasiones, las zonas geográficas que reciben gran cantidad de radiación solar están lejos de sistemas de abastecimiento de energía convencionales. Por ello, parece razonable contemplar la posibilidad de establecer una planta de generación de potencia autárquica basada en energía solar que esté destinada a la generación de electricidad además de a posibilitar la capacidad de acumulación de energía térmica solar para otros usos importantes como son el agua caliente sanitaria, el aire acondicionado a partir de una máquina de absorción o la energía térmica para una planta de desalación solar.

En el PFC presentado, se pretenden satisfacer las necesidades de agua y energía en una zona urbanizada en la sureña ciudad marroquí de Dahka ([23°43'N 15°57'W\(1\)](#)). Se trata de una zona residencial destinada a 5000 familias que vivirán allí durante todo el año. Las necesidades de agua y electricidad de dicha población se verán cubiertas. La demanda eléctrica se corresponde con los niveles estándar de los países desarrollados y la de agua incluye consumo humano básico, jardines y ocio (por ejemplo piscinas). Dichas necesidades de agua se deben cubrir por medio del agua obtenida mediante una planta desaladora.

El uso de energías renovables, energía solar en este caso, no sólo persigue alcanzar un sistema autárquico, independiente de fuentes externas de energía convencionales (como por ejemplo combustibles fósiles) sino que también ofrece una alternativa positiva en un contexto medioambiental (sistema de emisión cero) además de ofrecer un desarrollo global más sostenible. Estos sistemas se ciñen a las restricciones del protocolo de Kyoto gracias a las emisiones virtualmente nulas generadas en el proceso.

A la hora de elegir el sistema concreto que queremos implementar para cubrir las necesidades arriba mencionadas, se analizan varias posibilidades tecnológicas para poder seleccionar el modelo que mejor se ajuste. Los aspectos económicos sólo se han contemplado grosso modo, en una escala más generalista. Nuestro proyecto se centra más en el campo puramente técnico.

Una vez se haya elegido el modelo a desarrollar, se procede con el modelado de dicho sistema empleando el programa informático TRNSYS. Es un programa que desarrolla modelos transitorios con una estructura modular. Reconoce un lenguaje de descripción en el que el usuario especifica los componentes que constituyen el sistema y la manera en la que están interconectados. Es software comercial desarrollado por la universidad de Wisconsin. Como con cualquier simulación, los datos obtenidos son contrastados con los calculados en ámbito teórico.

Por último, sugerimos un posible modelo que cumpliría con las demandas y necesidades de nuestro sistema.

## 2. ANALISIS DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DISPONIBLES.

Existen muchos modelos disponibles, los cuales se recogen en detalle en el texto completo. En este resumen se plasman los modelos finalmente elegidos y la justificación por la que fueron seleccionados de entre las demás posibilidades.

### 2.1 SISTEMA SOLAR DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Para la elevada cantidad de energía eléctrica que se necesita generar para cubrir la demanda, la solución ideal sería implementar una planta de potencia con turbina + generador. Consecuentemente, para que el ciclo termodinámico pueda operar correctamente y se consiga generar vapor que permita unos rangos de eficiencia suficientes, se necesitará alcanzar altas temperaturas. Por ello, para emplear la energía del sol se emplea un colector que sea del tipo “concentrador”. A las temperaturas a las trabajaremos, se empleará una planta de ciclo Rankine. De los disponibles, el más viable es el campo de **concentradores solares parabólicos**, por cuyo foco circula dentro de una tubería el fluido de trabajo, aceite térmico, que consigue calentarse hasta los 390°C y que será el que, mediante intercambiadores de calor, genere vapor en la planta Rankine.

En cuanto a la acumulación de energía térmica para poder tener un funcionamiento de 24 horas al día, se ha elegido un **acumulador térmico de hormigón** junto con un **aceite térmico** como fluido de transmisión de calor. La razón principal de esta elección se debe a que en las bibliotecas del TRNSYS, era la opción más viable. Sin embargo, sería interesante llevar a cabo un análisis más detallado de los sistemas de sales fundidas destinados a la acumulación térmica.

### 2.2 PLANTA DE DESALACIÓN DE AGUA DEL MAR

La tecnología de la planta de desalación será la “**multi-stage flash**”. Es la que mejor combina con energía térmica solar. En los procesos con membranas, como el de ósmosis inversa, se requiere mucha más electricidad y el mantenimiento de la instalación es mucho más complejo y caro.

### 2.3 AGUA CALIENTE SANITARIA

En el presente proyecto, los dos apartados siguientes no se han desarrollado pero si se menciona que la opción óptima sería emplear colectores no concentradores. Los colectores planos se emplean mucho para este uso aunque los colectores de vacío otorgarían mayor eficiencia.

### 2.4 SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO

Para esta opción, se debería contemplar una máquina de absorción puesto que el sistema tradicional de compresión mecánica requiere grandes cantidades de electricidad para poder operar correctamente. Para alimentar la máquina de absorción, se contemplaría los colectores de vacío que ofrecen una suficientemente alta temperatura de operación o un sub-sistema de cogeneración con la planta de potencia.

### 3. ESTIMACIÓN DE DEMANDA DE AGUA

En esta sección se estima la cantidad total de agua que nuestro sistema necesitará. Los cálculos se dividen en los siguientes apartados:

- Consumo humano
- Piscinas y ornamentos de arquitectura paisajística
- Mantenimiento
- Campos de golf y jardines

Los detalles de cálculo están incluidos en el PFC completo. Aquí se recoge el total de agua necesitado.

	<b>DEMANDA DE AGUA (LITROS/DÍA)</b>
CONSUMO HUMANO	3.000.000
PISCINAS/ARQUITECTURA PAISAJÍSTICA	26.400
MANTENIMIENTO	300.000
CAMPOS DE GOLF/JARDINES	684.931
<b>TOTAL</b>	<b>4.011.331</b>

Tabla 1 Demanda total de agua

## 4. ESTIMACIÓN DE DEMANDA ELÉCTRICA

Los siguientes apartados reflejan los requerimientos del sistema independientemente de los sistemas que se vayan a emplear.

- **ELECTRICIDAD:**
  - Potencia para iluminación, electrodomésticos, servicio de lavandería, etc.
- **PLANTA DESALADORA:**
  - Energía primaria necesaria: calor (proceso de desalación)
  - Energía secundaria necesaria: electricidad (bombas, valvulería)
- **AIRE ACONDICIONADO**
  - Aire frío
  - Aire caliente
- **AGUA CALIENTE SANITARIA:**
  - Usos principalmente higiénicos (cocina, baños, etc)

Los resultados de las estimaciones se recogen en la siguiente tabla. De nuevo, todos los detalles de cálculo se incluyen en el texto completo del PFC.

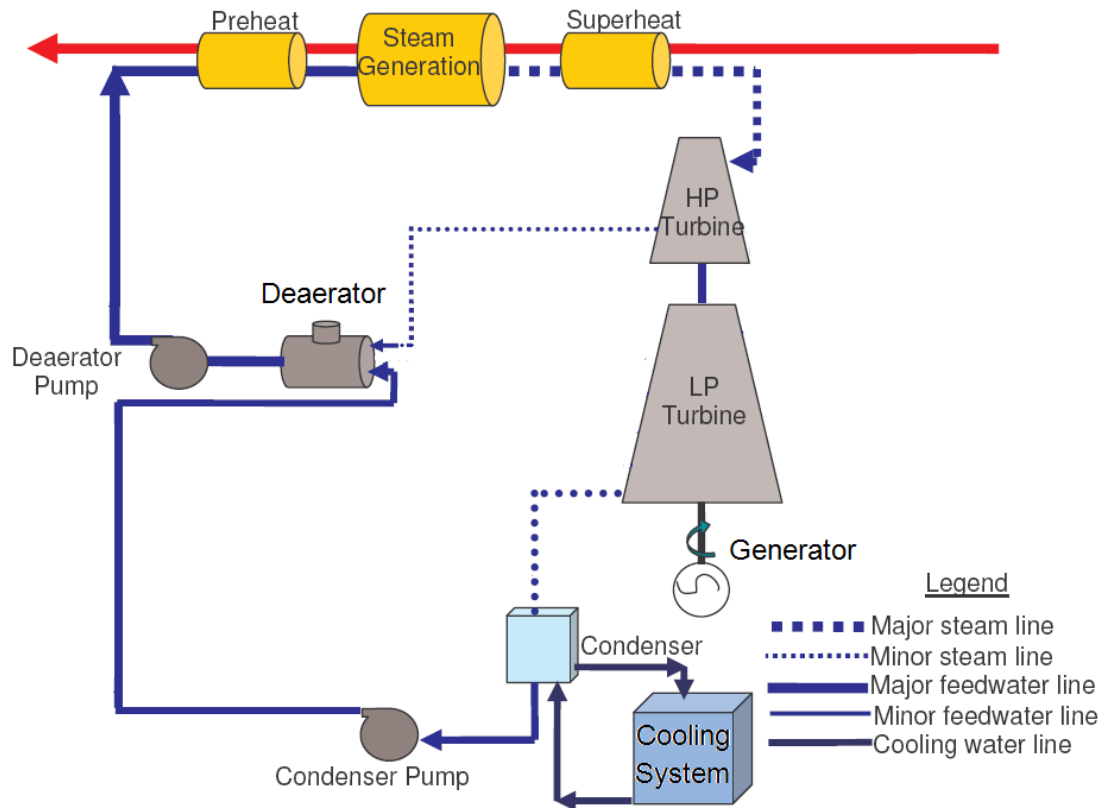
Demanda anual	712.288 MWh
Demanda media de potencia	81,31 MW
Media diurna (11 horas/día)	99,05 MW
Media nocturna (13 horas/día)	66,48 MW
Demanda mínima anual de potencia	≈36 MW
Demanda máxima anual de potencia	≈162 MW

Table 2: Valores de demanda eléctrica



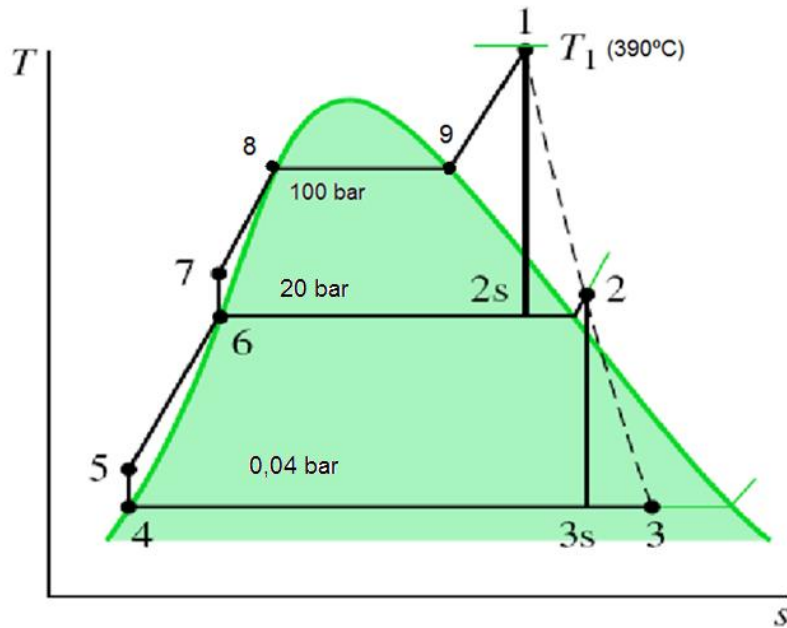
## 5. MODELO DE CICLO DE POTENCIA

En esta sección se desarrolla el modelo de ciclo de potencia elegido para generar electricidad. Es un ciclo de Rankine. A continuación se incluye un esquema de dicho modelo:



El aceite térmico que se ha calentado hasta los 390°C en el campo de paneles solares recorre la tubería que aparece de color rojo en el esquema e intercambia calor con el agua/vapor que circula por la tubería coloreada de azul y que es el fluido de trabajo del ciclo de Rankine. El agua se calienta en el “preheat” o precalentador, pasa a estado de vapor en el “steam generator” o generador de vapor y se sobrecalienta en el “superheater” o sobrecalentador. De aquí pasa a la primera fase de la turbina de vapor, fase de alta presión, a partir de la cual hay un sangrado que va al feedwater abierto o “deaerator”. El resto del vapor pasa a la segunda fase de la turbina, fase de baja presión, de donde llega al condensador. De ahí, una bomba o “condenser pump” se encarga de impulsar el agua (elevando la presión) hasta el feedwater abierto. Aquí se mezcla con el sangrado y es bombeado de nuevo al precalentador, completando así el ciclo.

Seguidamente se incluye un diagrama T-S del ciclo:



En él se pueden apreciar los distintos puntos termodinámicos del ciclo. Todos los cálculos se desarrollan en detalle en el texto completo. Aquí se incluye una tabla de resultados.

- Entalpías:

$h_1=3065,86 \text{ kJ/kg}$	$h_5=141445 \text{ kJ/kg}$
$h_2=2758,28 \text{ kJ/kg}$	$h_6=908,62 \text{ kJ/kg}$
$h_3=2005,9 \text{ kJ/kg}$	$h_7=1002,76 \text{ kJ/kg}$
$h_4=121,40 \text{ kJ/kg}$	$h_8=1407,87 \text{ kJ/kg}$

- Trabajo extraído de las turbinas (p.u.masa):

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_3) = 834,25 \text{ kJ/kg}$$

- Trabajo empleado por las bombas (p.u.masa):

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}_1} = (h_7 - h_6) + (1 - y)(h_5 - h_4) = 108,34 \text{ kJ/kg}$$

- Calor introducido al generador de vapor (p.u.masa):

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_7) = 2063,1 \text{ kJ/kg}$$

- Eficiencia térmica del ciclo:

$$\eta = \frac{\dot{W}_t / \dot{m}_1 - \dot{W}_p / \dot{m}_1}{\dot{Q}_{in} / \dot{m}_1} = 0,35 = 35\%$$

- Flujo másico para una potencia demandada de 162 MW:

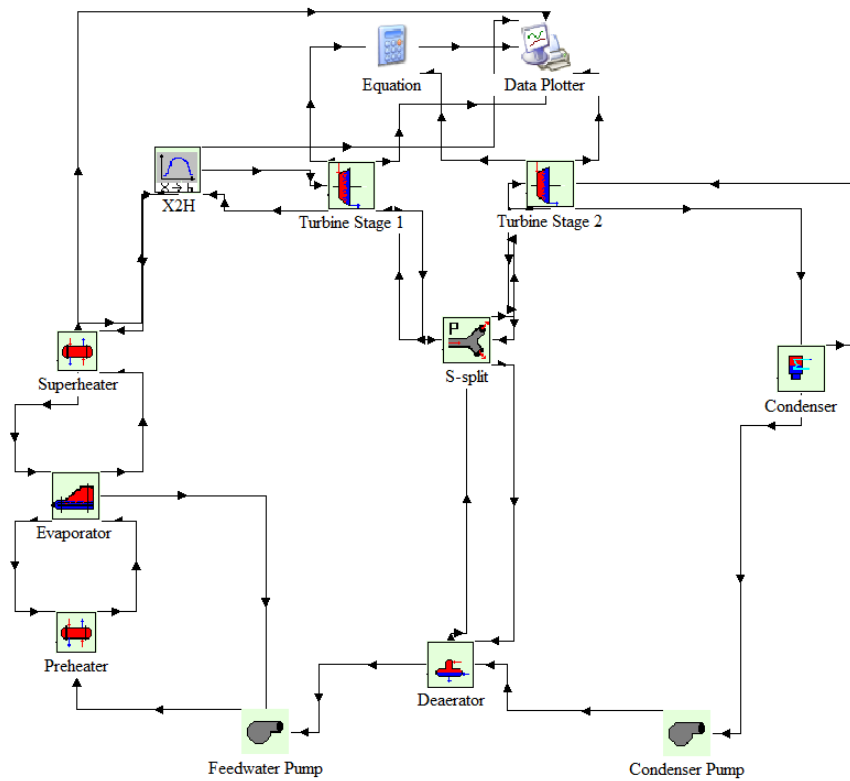
$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{W}_{demand}}{\dot{W}_{cycle}} = \frac{162 MW}{725,91 kJ/kg} = 223 \frac{kg}{s} = 802800 \frac{kg}{h}$$

También se ha procedido al cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor de los intercambiadores empleando el método  $\epsilon$ -NTU. La tabla resumiendo los datos es la siguiente:

ELEMENTO	UA [kW/K]
Precalentador	5464
Generador de vapor	11230
Sobrecalentador	5170

A continuación, se desarrolla este mismo modelo en la plataforma TRNSYS. Primeramente se diseña el ciclo Rankine únicamente y los resultados obtenidos mediante la simulación se contrastan con los teóricos ya calculados. Una vez se verifiquen éstos, se procede a la adición del campo solar al ciclo Rankine (concentradores parabólicos). Para este apartado ya se incluye en el modelo un archivo de datos atmosféricos específicos de nuestro entorno, en Dahkla, Marruecos. Por último, el tercer sistema desarrollado será uno en el que se le añade un acumulador térmico de hormigón al sub-sistema anterior. Esto permitirá que la planta de potencia funcione en ausencia de radiación solar por la noche o en momentos muy nublados.

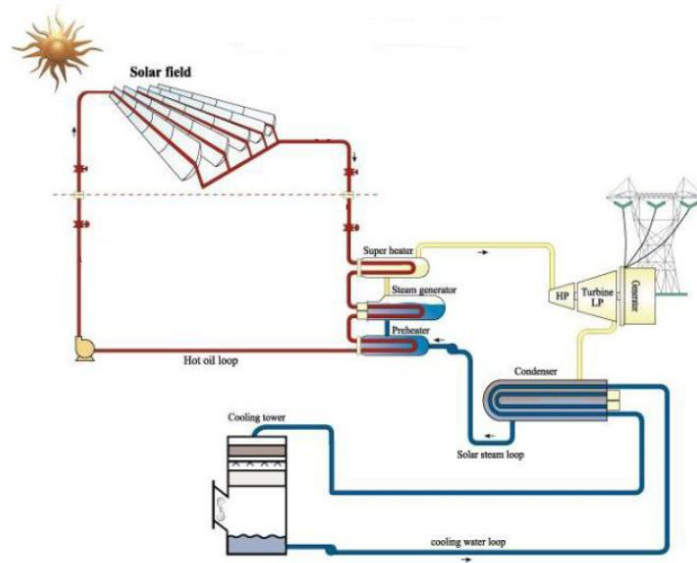
## 5.1 Modelo Rankine en TRNSYS:



PARAMETRO	VALOR EN TRNSYS	VALOR TEÓRICO
h1 (turbine 1 inlet)	3077 kJ/kg	3065 kJ/kg
h2 (turb1 outlet/turb2 inlet)	2716 kJ/kg	2758 kJ/kg
h3 (turbine 2 outlet)	1872 kJ/kg	2005,9 kJ/kg
Preheater water Temp (outlet)	309,5 °C	310,99°C
Superheater Steam Temp (outlet)	388,5 °C	390 °C
Condenser pressure	0,046 bar	0,04 bar
Total Turbine Power	$5,87 \cdot 10^8$ kJ/h	$5,83 \cdot 10^8$ kJ/h
Pressure at 1	96,10 bar	100 bar
Pressure at 2	18,80 bar	20 bar
Pressure at 4	0,0426 bar	0,04 bar
Pressure at 7	99,12 bar	100 bar
Pressure at 8	98,12 bar	100 bar
Pressure at 9	97.16bar	100 bar
Temperature at 1	389,7°C	390°C
Temperature at 4	30°C	28,96°C
Temperature at 7	208,9°C	231,9°C
Temperature at 9	308,4°C	310,11°C

## 5.2 Modelo de Rankine más campo solar en TRNSYS:

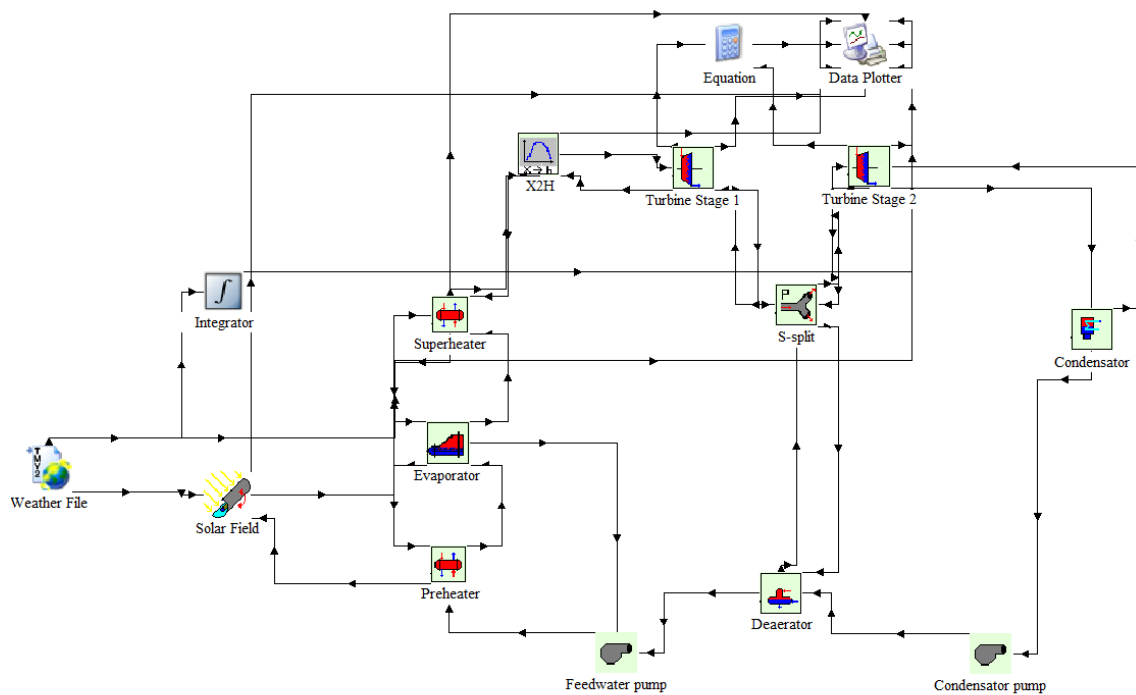
Aquí se incluye un esquema del aspecto general del sistema.



Los cálculos de la superficie de colectores necesaria vienen incluidos en la versión completa del texto. El resultado inicial será:

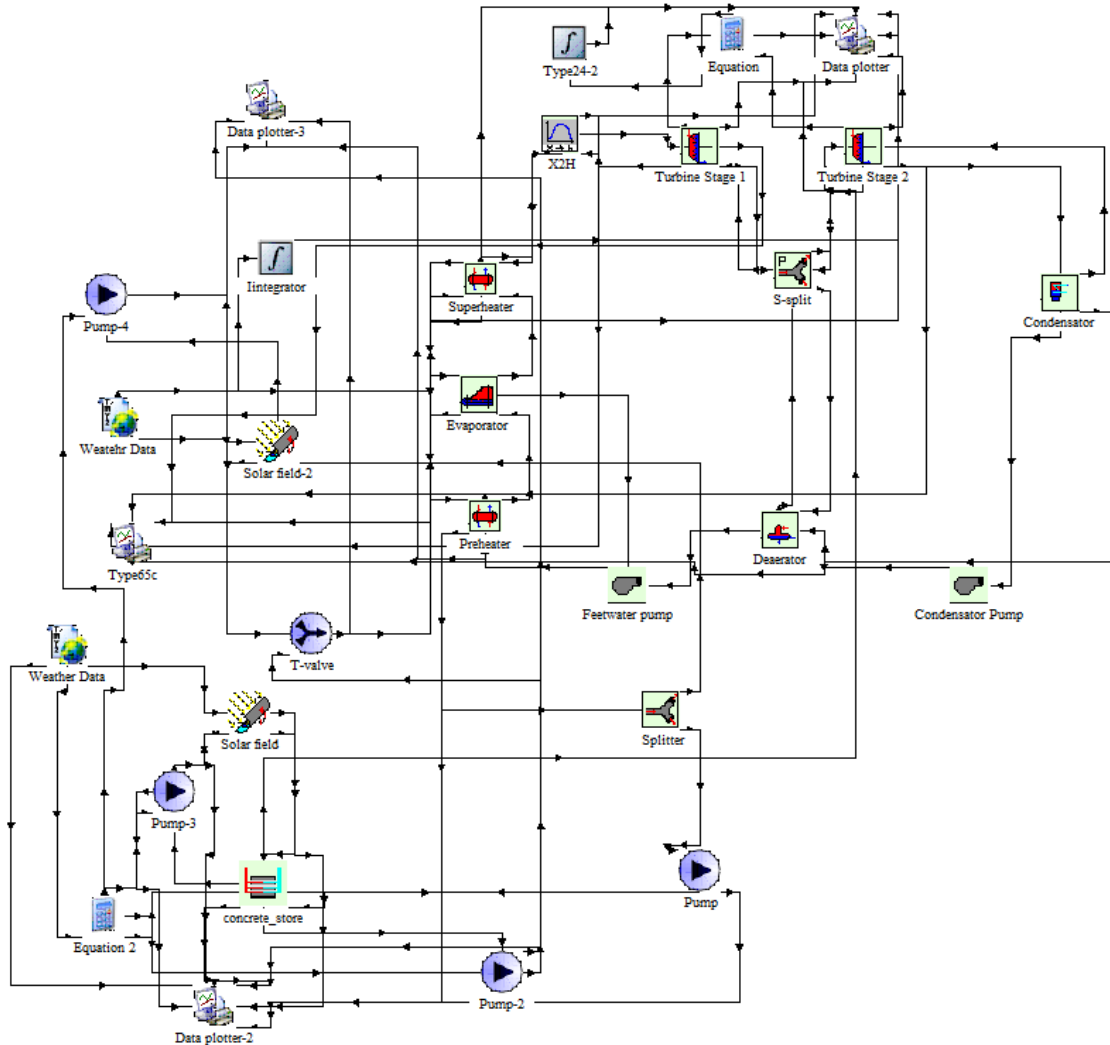
$$Area\ solar = 625.473m^2$$

El esquema en TRNSYS tiene el siguiente aspecto.



### 5.3 Modelo de Rankine con campo solar más acumulador térmico:

Puesto que no se genera electricidad en ausencia de irradiaciones solares, se procede a la inclusión del acumulador térmico de hormigón. En este caso, el sistema consta de dos campos solares: uno igual que el presente en el apartado anterior y otro que sólo alimenta al acumulador térmico. Existe un sistema de regulación que, cuando las irradiaciones solares son menores que un cierto nivel, desconecta el circuito primario del campo solar y conecta a la vez el secundario (el del acumulador térmico) de tal manera que siempre habrá aceite térmico calentado circulando por los intercambiadores aceite/agua del Rankine.



La masa total de hormigón estimada (calculada en detalle en el escrito completo) es:

$$m_{\text{hormigón}} = \frac{Q_{\text{hormigón}}}{c_{p_{\text{hormigón}}}(\Delta T)} = 141,8 \cdot 10^6 \text{ kg} = 141.802 \text{ Tm}$$

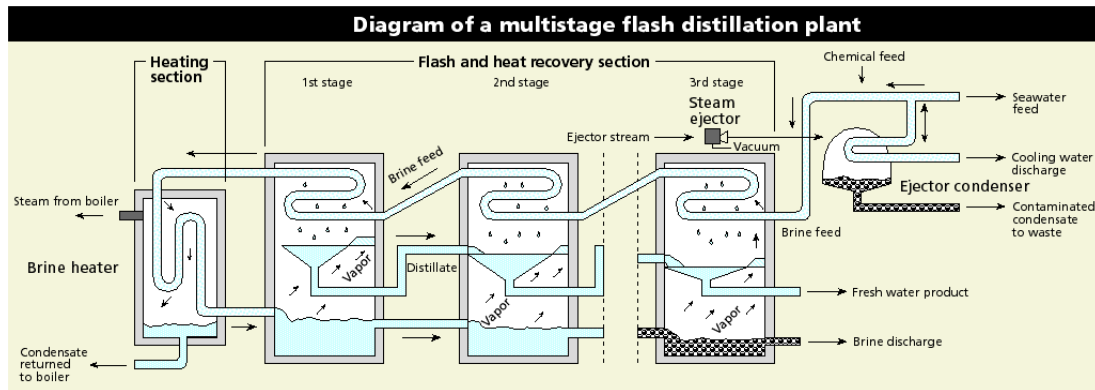
Modificando los principales parámetros del sistema podemos ajustar la instalación a nuestras necesidades. Los resultados óptimos son los obtenidos con los siguientes parámetros:

- Campo de colectores solares: 590 paralelo x 590 en serie con 6m<sup>2</sup> de apertura
- Flujo de fluido de transferencia térmica de campo solar a acumulador térmico de hormigón: 695kg/s
- Masa de hormigón total 1.323.000.000kg (cubo de 85m<sup>3</sup>).

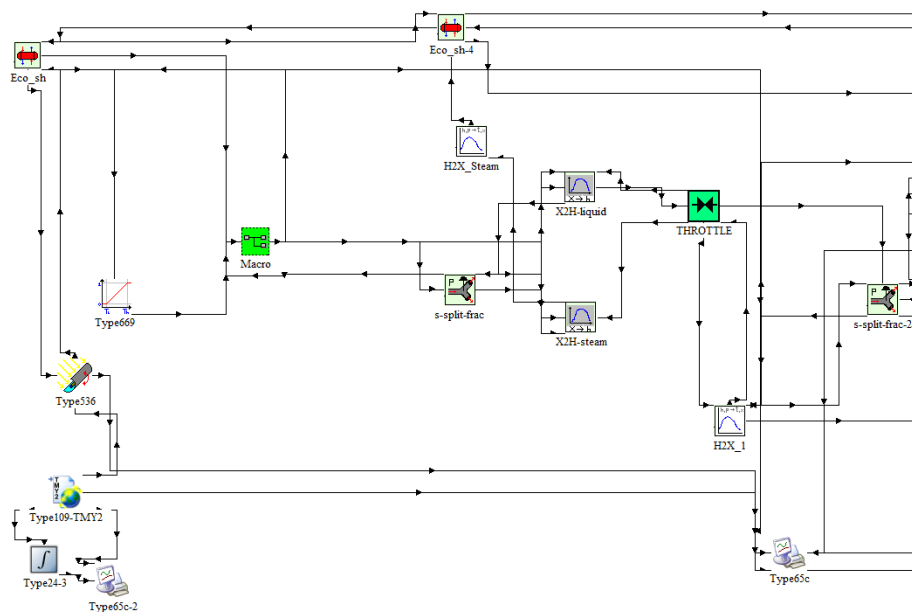
Los balances de energía y los cálculos detallados aparecen en el texto completo.

## 6. PLANTA DESALADORA

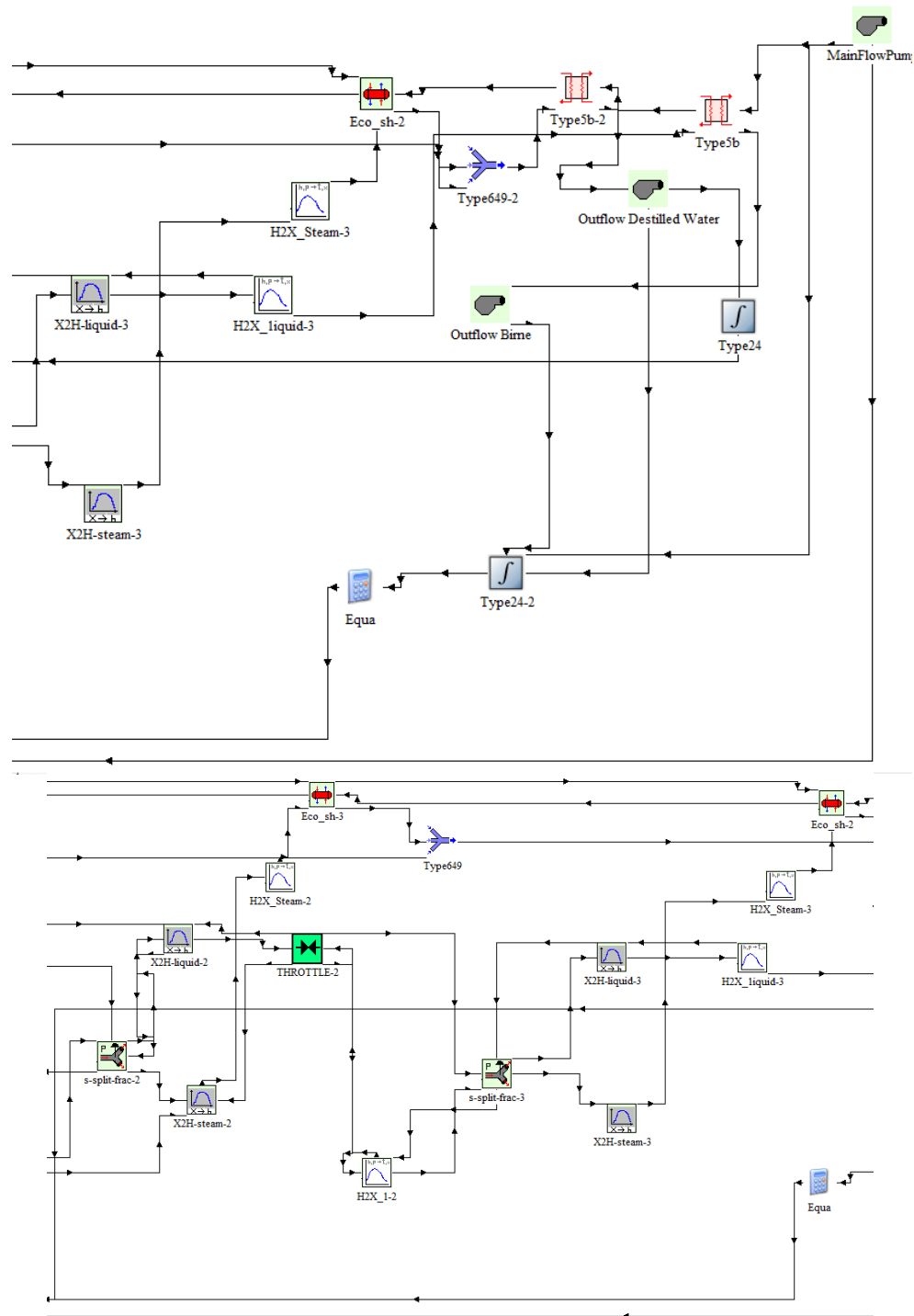
El modelo de planta desaladora seleccionado es el de MSF (multi-stage flash). La siguiente figura representa un esquema de dicho modelo.



El esquema TRNSYS es el siguiente, desglosado en tres imágenes debido a su longitud. Aparece de izquierda a derecha.







Estos son los parámetros del sistema:

Production	4012 m3/day
Electric power required	1809kW
Sea water flow	401 m3/h (10 hours a day)
Heat input	30150kW

El modelo diseñado ofrece datos que se corresponden con los datos esperados, calculados a nivel teórico.

$$\text{Flujo de agua de mar} = 891.555,6 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

		ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3
LIQUIDO		T <sub>1l</sub> =99,63°C	T <sub>2l</sub> =73,75°C	T <sub>3l</sub> =38,25°C
		P <sub>1l</sub> =1bar	P <sub>2l</sub> =0,37bar	P <sub>3l</sub> =0,07bar
VAPOR		T <sub>1v</sub> =99,63°C	T <sub>2v</sub> =73,75°C	T <sub>3v</sub> =38,25°C
		P <sub>1v</sub> =1bar	P <sub>2v</sub> =0,37bar	P <sub>3v</sub> =0,07bar
FLUJO MÁSICO	Liquido	m <sub>1l</sub> =13373,3l/h	m <sub>12</sub> =133376,4l/h	m <sub>13</sub> =131058,7l/h
	Vapor	m <sub>v1</sub> =75782l/h	m <sub>v2</sub> =62408,9l/h	m <sub>v3</sub> =49303,0l/h

## 7. CONCLUSIONES

Después de analizar las distintas tecnologías disponibles, se ha seleccionado la combinación más eficiente para asegurar el máximo rendimiento y el más óptimo funcionamiento del sistema. La principal pauta a la hora de tomar esta decisión ha sido conseguir un sistema capaz de funcionar de manera continuada, empleando para ello sólo energía solar. El resultado total es la implementación de un sistema globalmente más sostenible y que genere virtualmente cero emisiones de gases de efecto invernadero y ningún otro tipo de contaminantes atmosféricos.

Para la generación de energía eléctrica se ha seleccionado un campo de concentradores parabólicos que calientan un fluido (aceite térmico) hasta los 390°C y que alimenta un ciclo Rankine y da pie a la generación de vapor sobrecalentado en éste. Conectado al sistema se tiene un acumulador de energía térmica de hormigón capaz de permitir el funcionamiento del mismo aún cuando no hay suficiente irradiación solar, tanto en presencia de nubes como de noche. Los resultados obtenidos indican que durante el día se obtiene el máximo de potencia generada y por la noche, esta potencia obtenida decrece en un 35%, lo cual se ajusta al comportamiento de las curvas de demanda, quedando así las necesidades totalmente cubiertas las 24 horas del día.

Para el abastecimiento de agua, se ha diseñado una planta desaladora “multi-stage flash” o de múltiple efecto. El 95% de la energía requerida por dicha instalación es térmica y se obtiene directamente de un campo solar. El 5% restante es eléctrica y procede de la planta de potencia arriba mencionada. El sistema destila 4.012.000 l/día empleando una superficie solar de 136.806m<sup>2</sup>. Un tanque de acumulación de agua solventa los problemas de disponibilidad de agua en carencia de energía solar. Es más fácil destilar más agua de la necesaria durante el día y acumularla que acumular energía y continuar el proceso por la noche.

Los modelos desarrollados con TRNSYS han resultado exitosos a nivel general. Han demostrado la viabilidad técnica y teórica de los sistemas en una primera aproximación. AÚn así, para poder realmente considerar estos sistemas como totalmente válidos y desarrollables en un contexto real, se requeriría mayor detalle y precisión en los modelos simulados. Para poder hacer esto, sería necesario un profundo conocimiento del programa TRNSYS, un mayor nivel de detalle y por supuesto una mayor fuerza de trabajo. Se recomendaría programar componentes específicos para los sistemas asegurando así la compatibilidad entre dichos componentes al igual que la obtención de un funcionamiento que fuese el exactamente deseado, con todo detalle.